

Ljubivoj Cvitaš, Dubravko Žigman, Krešimir Meštrović

Tehničko veleučilište u Zagrebu

Sažetak

U radu je opisan koncept pronalaženja položaja Sunca primjenom optičkih senzora u svrhu boljeg rasporeda fotonaponskih panela, a zbog povećanja njihove učinkovitosti. Poboljšanja u pretvorbi sunčeve energije u električnu, jednako kao smanjenje cijene i troškova, imali su utjecaj pri razvoju fotonaponskih sustava. Bez obzira na viši stupanj učinkovitosti i niže cijene ugradnje, cilj ostaje povećanje snage fotonaponskih sustava pod različitim uvjetima osvjetljenosti. Predočen je razmještaj optičkih senzora, te utjecaj sjenila na fotostruje prema azimutu i elevaciji za dvije vrste sjenila.

Ključne riječi: *senzor, sjenilo, svjetlo, sunce, obnovljivi izvori, foto napon*

Abstract

The paper describes a concept of sun tracking system based on the application of optical sensors used to enhance positioning of photovoltaic panels in order to increase their efficiency. Improvements in solar energy conversion as well as price and cost reduction have induced the photovoltaic system development. Regardless of higher efficiency rate and lower installation costs the objective remains increasing power of photovoltaic systems in various light conditions. Optical sensor arrangement and shade effect on photocurrent using the azimuth and elevation reference voltage are both demonstrated on two types of shades.

Key words: *sensor, shade, light, Sun, renewable resources, photovoltage*

1. UVOD

Upotrebom sunčeve energije kao čiste i obnovljive energije može se u značajnoj mjeri smanjiti korištenje drugih oblika energije, prije svega one iz fosilnih goriva, čime se utječe na

smanjenje globalnog zagrijavanja i onečišćenja zraka. Takva energija se dobiva fotonaponskom pretvorbom sunčeve energije u električnu energiju [1]. Zbog promjene azimuta i elevacije sunčevog zračenja, iskoristivost takve energije u slučaju fiksnih fotonaponskih panela je uvelike manja od sustava s pokretnim osima [2]. Jednoosnim sustavima se poboljšava iskoristivost zračenja prema azimutu, a dvoosnim i prema elevaciji [3]. Najveća iskoristivost sunčeve energije je kada upadni kut zračenja na fotonaponske panele iznosi 90°. Iz toga proizlazi istraživanje najboljeg načina praćenja upadnog kuta i pretvorbenog mehanizama dvoosnih sustava. Zbog fotonaponskih karakteristika senzora, značajnu ulogu pri proračunu imaju oblici sjenila.

Polazno istraživanje obuhvaća ispitivanje postojećih rješenja realizacije senzora intenziteta sunčevog zračenja [4], [5]. S obzirom da se sunčevo zračenje sastoji od frekventnog spektra u rasponu od 100 nm do 1000 nm, infracrveni dio spektra (od 700 do 1000 nm) dobar je reprezentant intenziteta zračenja. Naime, preko 40% ukupne energije zračenja nalazi se u tom dijelu spektra [5].

Infracrvene (IR) fotodiode novije generacije dobar su izbor senzora zbog svoje male dimenzije, širokog kuta pojačanja te praktične mogućnosti montaže na odgovarajući supstrat ili tiskanu pločicu. Prikladna dimenzija i mogućnost površinske montaže više paralelno vezanih IR fotodioda, uvjet su za njihov smještaj pod zadanim kutom u segmente prostorne sfere. Takvo rješenje omogućuje integriranja višesegmentnog senzora na način da se na bazi elementarnih računskih operacija može rasporediti izvor zračenja i prema azimutu i prema elevaciji te registrirati tzv. pozadinsko osvjetljenje.

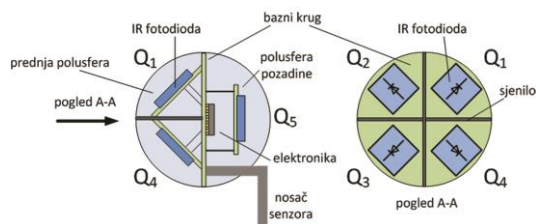
Ugradnja prikladnog mikroupravljača s višekanalnim analogno-digitalnim (A/D) pretvornikom te digitalnom komunikacijom, čini segmentno rješenje senzora općenito primjenljivim u više primjena, a posebno u sustavima za pozicioniranje fotonaponskih ploča.

2. ISTRAŽIVANJE

Senzor svjetla treba naznačiti vektor upadnog svjetla iz smjera najjačeg izvora svjetlosti na horizontalnu površinu, uzevši pri tom u obzir zbroj izravnog sunčevog zračenja i reflektiranog zračenja od okolnog tla, objekata i od oblaka. Vektor upadnog svjetla određuje se kutom azimuta i kutom elevacije u odnosu na horizontalnu plohu čije je središte zemljopisna pozicija smještaja senzora. U slučaju izostanka reflektiranih zračenja vektor upadnog svjetla pokazuje točno na trenutačnu poziciju sunca na nebeskoj sferi u odnosu na ishodište senzora.

Primjena petosegmentnog senzora je prije svega u sustavu za raspoređivanje fotonaponskih ploča u dvije osi (PV tracking) koji se primjenjuje za povećanje iskoristivosti fotonaponskih elektrana, ali se može primijeniti i za pozicioniranje zaštite od sunčevog zračenja, traženja točke najvećeg svjetlosnog zračenja i slično.

Senzor se sastoji od pet infracrvenih foto dioda smještenih unutar posebne konstrukcije te elektronskog sklopa koji se koristi za prilagodbu signala s dioda (slika 2.1). Tijelo senzora podijeljeno je na dvije polusfere. Prednja polusfera nosi 4 IR foto diode smještene u 4 kvadranta koji su međusobno odijeljeni pregradama – sjenilima. Stražnja polusfera ima jednu IR foto diodu smještenu blizu baznog kruga koji razdvaja polusfere, a osjetilna površina diode paralelna je s površinom baze tako da može „osjetiti“ svjetlosne zrake iz područja te polusfere.



Slika 2.1 Prikaz rasporeda foto dioda u petosegmentnom senzoru

U prednjoj polusferi su infracrvene foto diode optički razdvojene u četiri kvadranta konusnim sjenilom koji se sastoji od dva međusobno ukrštena trokuta. U odnosu na bazu sfere diode su položene tako da im je osjetilna ploha pod kutom od 45°. Na taj način svaka od senzorskih dioda generira najveću foto struju kada upadne zrake djeluju okomito na osjetilnu površinu, odnosno kada dolaze iz „središta“

sfernog kvadranta. Međutim, dok je za jednu od 4 IR foto diode kut upada zraka optimalan, za ostale tri diode kut upada je nepovoljan, a generiranje foto struje dodatno je narušeno zbog djelovanja križnog sjenila.

Najveći ukupni učinak zračenja na sve četiri IR fotodiode postiže se kada je vektor upadnog svjetla okomit na križni spoj sjenila odnosno okomit na baznu plohu sfere. Samo u tom slučaju su fotostruje sve četiri diode jednake budući da upadne zrake padaju na osjetilne plohe dioda pod istim kutom (45°), uz odsustvo zasjenjenja.

$$I_{q1} = I_{q2} = I_{q3} = I_{q4} \quad (2.1)$$

U primjeni, u slučaju rasporeda fotonaponskih ploča prema dvije osi, sastavlja se petosegmentni senzor tako da mu bazna ploha sfere bude paralelna s plovom fotonaponskih ploča, a križno sjenilo raspoređeno tako da je jedna pregrada paralelna s horizontom, a druga okomita na taj smjer. Za praćenje najvećeg izvora svjetla prema azimutu računa se sljedeće:

$$\Delta I_{az} = (I_{q1} + I_{q4}) - (I_{q2} + I_{q3}) \quad (2.2)$$

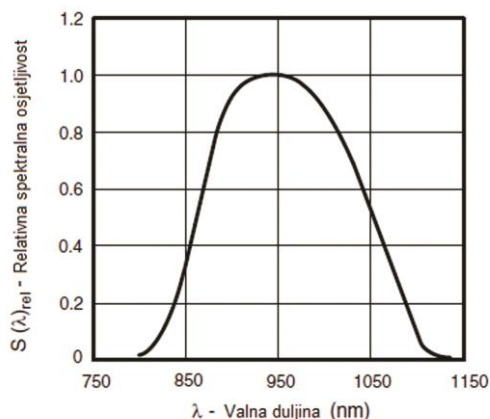
gdje je ΔI_{az} struja greške azimuta, a I_{qx} foto struje pojedinih dioda

Raspored prema azimutu postiže se uz uvjet dobivanja minimalne struje greške ΔI_{az} . Za praćenje najvećeg izvora svjetla prema elevaciji koristi se izraz:

$$\Delta I_{el} = (I_{q1} + I_{q2}) - (I_{q3} + I_{q4}) \quad (2.3)$$

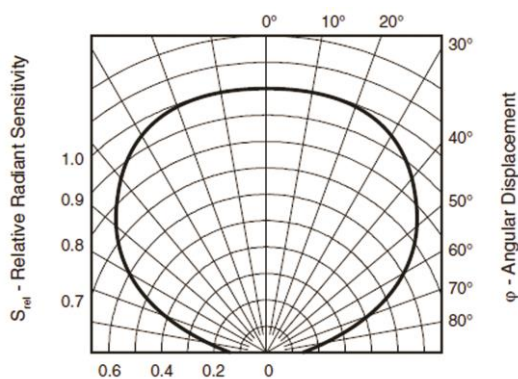
gdje je ΔI_{el} struja greške elevacije

Kao optički senzori koriste se fotodiode tipa BPW41N [7]. Struja koju generira osvijetljena fotodioda je mala, do 100 μA pa je potrebno pojačalo da se može dobiti koristan signal za daljnju analizu. Pojačalo je spojeno u takvu konfiguraciju da pretvara strujni signal fotodiode u napon na svom izlazu [8].



Slika 2.2 Relativna spektralna osjetljivost foto diode BPW41N¹

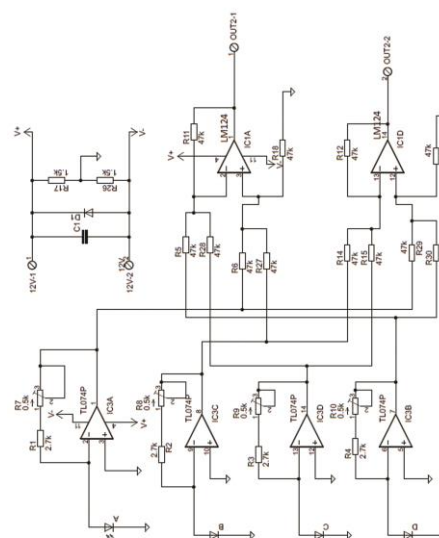
Na veličinu foto struje, također ima utjecaj valna duljina svjetlosti kojom je foto dioda osvjetljena (relativna spektralna osjetljivost) i kut pod kojim svjetlost pada na foto diodu (kutna osjetljivost, slika 2.2). Dioda BPW41N utvrđuje infracrveno zračenje u spektru valnih duljina od 870 do 1050 nm. Za zračenje svoje osjetljive plohe u rasponu od 0.01 do 2 mW/cm² foto dioda daje izlaznu foto struju u rasponu od 0.5 do 100 μA.



Slika 2.3 Kutna osjetljivost foto diode BPW41N¹

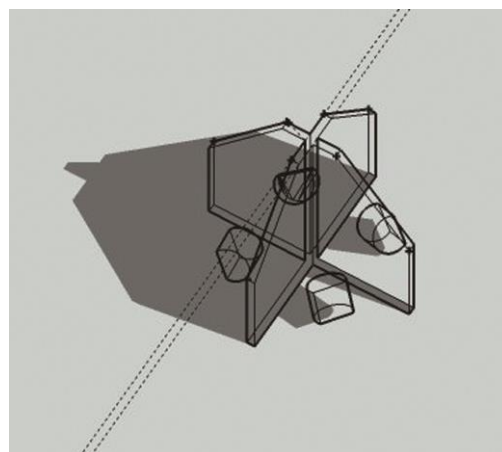
Sklop izrađen u analognoj tehnici predložen je na slici 2.4. Operacijska pojačala s velikim ulaznim otporom (FET) obavljaju konverziju foto struje u napon. Ostatak sklopa računa napon greške prema izrazima (2.2) i (2.3). Foto dioda je spojena s invertirajućim ulazom pojačala na način da kada je osvjetljena, njezina inverzna struja odnosno fotostruja ulazi na invertirajući ulaz tako da se na izlazu dobije pozitivan napon. Izlazni napon je osim foto strujom još određen i otpornikom u povratnoj vezi.

¹ Vishay Semiconductors, User manual BPW41N, Revision: 02-Oct-12



Slika 2.4 Shema sklopa za utvrđivanje položaja Sunca prema dvije osi

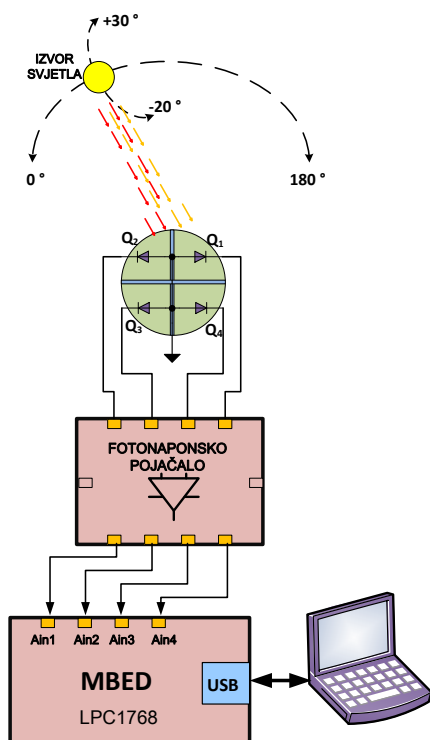
Na slici 2.5 u trodimenzionalnoj predodžbi uočava se križno sjenilo. Dimenzije sjenila odredit će dvodimenzionalnu karakteristiku ukupnog napona greške kojeg generira sklop.



Slika 2.5 Predodžba funkcije križnog sjenila

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Ispitivanje je provedeno s umjetnim izvorom svjetlosti, halogenim reflektorom od 150W učvršćenim iznad ispitnog pulta u prostoriji bez drugih izvora svjetla. Petosegmentni senzor postavljen je na gibljivi zglobovi držač u kojem se baždari raspored prema azimutu i elevaciji. Tijekom ispitivanja mjereni su naponi na izlazima foto pojačala. Pojačalo za generiranje napona greške realizira se za potrebe mjerenja digitalnim sklopom korištenjem modula MBED odnosno mikroupravljača LPC1768 [9]. Ispitna konfiguracija predložena je na slici 3.1.



Slika 3.1 Ispitna konfiguracija sklopa

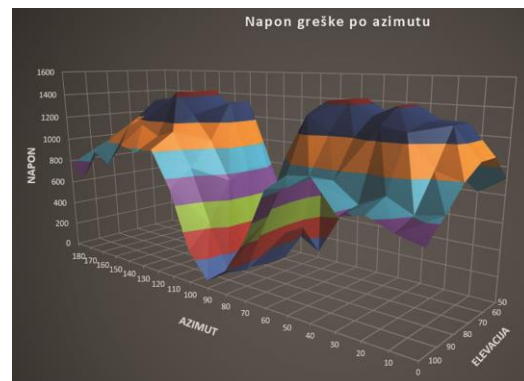
Sklop senzora zakretan je prema azimutu od 0° do 180° u koracima po 10° , a prema elevaciji u području od -30° do $+20^\circ$ s istim korakom. Mikroupravljač snima napone senzora i serijskom komunikacijom predaje podatke na prijenosno računalo na daljnu obradu.



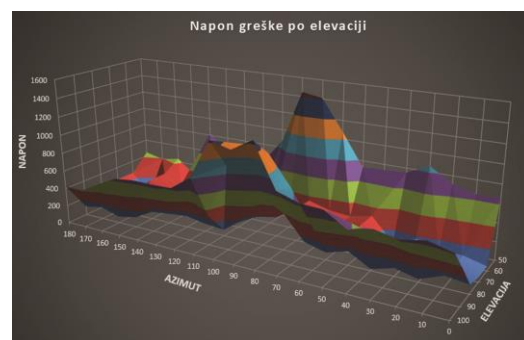
Slika 3.2 Ispitivanje s halogenim reflektorom

Ispitivanja su provedena s dva tipa sjenila: tip 1 kraće sjenilo, tip 2 produženo sjenilo. Analizom podataka sa svjetlosnih senzora dobiveni su naponi greške prema azimutu (slika 3.3) i elevaciji (slika 3.4). Ukupni zbroj napona greške prema obje dimenzije daje prostornu sliku koja pokazuje obrnuto okrenuti stožac s minimumom u prostornoj točki koja

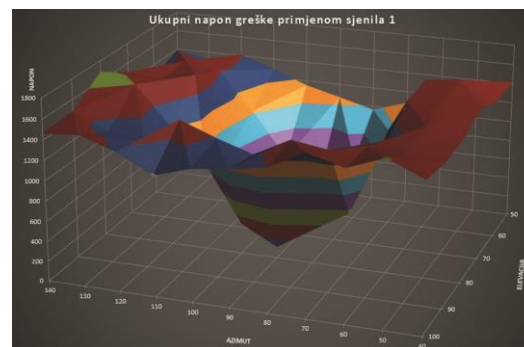
odgovara smjeru i iznosu najvećeg vektora osvjetljenja. Predodžba je dobivena algebarskim zbrojem korištenjem tabličnog kalkulatora. Rezultati mjerenja ukupnih napona greške predloženi su na slikama 3.5 i 3.6.



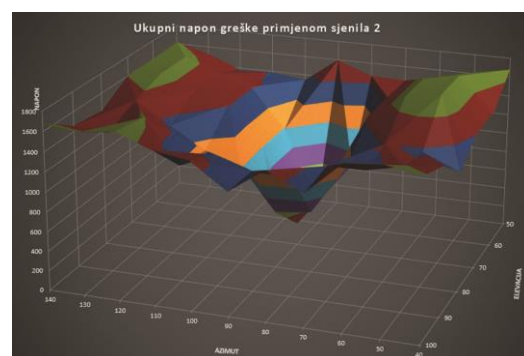
Slika 3.3 Napon greške prema azimutu



Slika 3.4 Napon greške prema elevaciji



Slika 3.5 Ukupni napon greške, sjenilo tip 1



Slika 3.6. Ukupni napon greške, sjenilo tip 2

4. DISKUSIJA

Analizom napona greške prema elevaciji (slika 3.4) uočljiva je linearnost pri okomitom vektoru upada kroz cijelo područje azimuta. Pri odmaku prema elevaciji većem od $\pm 20^\circ$ prema elevaciji dolazi do utjecaja sjenila, što ukazuje da se greška prema elevaciji povećava. Povećanjem visine sjenila dolazi do povećanja osjetljivosti na sjenu te ista počinje djelovati i pri manjem kutu.

Također, ako se promatra napon greške prema azimutu (slika 3.3) može se uočiti linearnost greške prema elevaciji koja se pojavljuje pri 90° . Greška na 90° prema azimutu jednaka je u slučaju svih tehnički mogućih elevacija, dok se pri promjeni elevacije, pri čemu kut vektora ne „upada“ okomito na senzor počinje primjećivati zasjenjenje u obliku pada greške. Također, može se uočiti da je greška najveća pri elevaciji $+45^\circ$ i -45° , kada je kut upadnog vektora svjetla okomit na diodu, što je i za očekivati zbog kutne osjetljivosti infracrvene diode BPW41N.

U slučaju kraćeg sjenila (slika 3.5), kada se promatra najveća greška može se vidjeti kako je greška stvarno najveća u trenutku okomitog upada svjetlosnog zračenja na jednu od foto dioda. To sjenilo daje „blaži“ prijelaz u područje apsolutnog minimuma napona greške (žarište u vrhu stošca).

U slučaju produženog sjenila može se primijetiti kako je imanentna greška znatno veća na rubovima odziva, ali i kako je vrijednost minimuma greške veća nego u slučaju kraćeg sjenila. Sa sjenilom tipa 2 može se dobiti veća osjetljivost na kut upada sunčevog zračenja i samim time točnije rasporediti senzor na točku okomitog upada svjetlosti na sam senzor.

Mikroupravljač koji sakuplja, mjeri i obrađuje napone (konvertirane foto struje senzora) trebao bi imati ugrađenu i funkciju umjeravanja jakosti signala foto dioda. Uz vektor svjetla okomit na glavnu simetralu križnog sjenila, trebalo bi normalizirati sva četiri signala na 100% iznosa, odnosno izračunati i zapisati korektivne koeficijente za svaki od senzora ponaosob. Obzirom na kutnu osjetljivost foto diode (slika 2.3) za očekivati je jakost signala pri okomitom upadu svjetla na površinu diode od približno 110%.

5. ZAKLJUČAK

U radu je predložena konstrukcija sklopa senzora za praćenje položaja Sunca. Ispitane su dvije vrste sjenila senzora. Utvrđeno je da je ovakav sklop senzora općenito primjenljiv u više prilika, a posebno u sustavima za raspored fotonaponskih ploča. Izborom sjenila moguće je dobiti sporije i brže odzive samog sklopa na promjene azimuta i elevacije izvora sunčevog zračenja. Izbor samog sjenila ovisit će o proračunu energetske učinkovitosti sustava za raspored fotonaponskih ploča. U nastavku razvojnog istraživanja trebalo bi ispitati utjecaj debljine sjenila na napon greške, utjecaj temperature na rad kompletnog sklopa te ugraditi petosegmentni senzor na dvoosni sustav rasporeda fotonaponskih ploča. Pri takvom načinu rasporeda treba istražiti faktor dobitka, tj. odnos uložene energije za sustav pozicioniranja u odnosu na dodatnu dobivenu energiju zbog točnijeg praćenja lokacije Sunca, uključivo i njegove odsjaje.

6. LITERATURA

- [1] A. Li, „Solar Photovoltaic-engineering Systems“, Beijing: Beijing University of Technology Press, 2001
- [2] J. Xue, „Design on automatic follow system of low power consumption solar cell based on HYM 8563 and single chip,“ Journal of Shenyang Institute of Engineering, vol. 1, no. (2,3), pp.113-116, 2005.
- [3] Y. Cao and W. Chen, „A new automatic sun-tracking control system for solar energy water-heater,“ Journal of Nantong Vocational College, vol. 21, no. 4, pp. 65-67, 105, 2007.
- [4] Tiberiu Tudorache, Liviu Kreindler: „Design of a Solar Tracker System for PV Power Plants“, Acta Polytechnica Hungarica, Vol.7, No. 1, 2010
- [5] Jing-Min Wang, Chia-Liang Lu: „Design and Implementation of a Sun

Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System”, *Sensors*, 2013, 13

- [6] Yiwang Wang: “Design of a Digital Solar Panel Automatic Tracking Controller for Photovoltaic Generation System”, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2012 Asia-Pacific
- [7] Vishay Semiconductors, User manual BRW41N, Revision: 02-Oct-12
- [8] Graeme Jerald G.: “Photodiode amplifiers: op amp solutions”, New York, McGraw Hill 1996
- [9] NXP Semiconductors: „Rapid prototyping for the LPC1768 MCU“, 2009 NXP B.V.



Dr. sc. Ljubivoj Cvitaš rođen je 1952. godine u Zagrebu. Diplomirao je 1976. i magistrirao 1982. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, a doktorsku disertaciju obranio je 2009. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Radio je 10 godina u KONČAR-Institutu za elektrotehniku kao specijalist za mikroprocesorsku tehniku, a posebno na višeprocorskom upravljanju dizalom. Godine 1986. zapošljava se u firmi ATM Zagreb u Sektoru razvoja. Kao specijalist za analogno-digitalne mjerne sustave radi na razvojnim projektima industrijske mjerne instrumentacije. Godine 1991. imenovan je voditeljem Sektora razvoja i istraživanja gdje koordinira rad 16 razvojnih inženjera. Vodi projekte razvoja sustava daljinskog nadgledanja, višeciklusnog računalna protoka, sustave nadgledanja u eksplozijski ugroženom prostoru i druge te u tom razdoblju objavljuje radove u časopisima i na skupovima vezane uz navedeno znanstveno područje. Preuzimanjem ATM-a od strane

korporacije Siemens te osnutkom Siemens d.d. u Hrvatskoj, nastavlja rad kao voditelj istraživanja i razvoja u novonastaloj tvrci. Područje rada proširuje se na međunarodne projekte obzirom da se uspostavlja široka suradnja sa Siemensovim razvojnim i proizvodnim centrima u Njemačkoj i Francuskoj. Na domaćoj znanstvenoj sceni povezuje se i surađuje s Fakultetom elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, Fakultetom Strojarnstva i brodogradnje u Zagrebu te posebno intenzivno na zajedničkim istraživačkim projektima sa Elektrotehničkim fakultetom sveučilišta J.J. Strossmayer u Osijeku. U okviru firme Siemens organizira 2002. godine u Zagrebu razvojno-istraživački centar za područje mjerenja temperature u industriji te vodi taj centar kao tehnički voditelj. Na Tehničko veleučilište u Zagrebu prelazi 2009. gdje i danas radi na kao predavač na Elektrotehničkom odjelu te voditelj razvojno istraživačkih projekata.



Mr.sc. Dubravko Žigman rođen je 28. lipnja 1970. godine u Zagrebu, gdje završava osnovnu školu i srednju matematičku školu (MIOC). Nakon odsluženja vojnog roka upisuje Elektrotehnički fakultet u Zagrebu 1990. godine. Tijekom studija aktivno učestvuje u domovinskom ratu na ratištu Posavine. Studij završava 1996. godine na smjeru Elektroenergetika, usmjerenju Opća energetika. Godine 1998. upisuje poslijediplomski studij za stjecanje akademskog stupnja magistra znanosti na FER-u. Godine 2002. stiče stručni naziv magistra znanosti iz polja Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika. Od 1996. zaposlen je na Višoj Tehničkoj Školi u Zagrebu u zvanju stručnog suradnika. Od 2006. radi na TVZ-u kao viši predavač te je član stručnog vijeća TVZ-a, član Povjerenstva za e-obrazovanje, član projektnog tima za uvođenje sustava upravljanja kvalitetom prema ISO 9001, CARNet koordinator, zamjenik pročelnika Elektrotehničkog odjela TVZ-a, predstojnik KiRT zavoda, mentor voditelj na Specijalističkom studiju Informatike modula

Projektiranje i implementacija računalnih mreža, voditelj NetAkademije, kao i voditelj Cisco akademije. Dobitnik je sljedećih nagrada: 2013.g. nagrada u kategoriji CCNP Curricula Excellence – priznanje je za stalnu predanost i poticanje polaznika na izvrsnost i napredak, a NetAkademija ga je dobila u konkurenciji 1.818 akademija iz 30 zemalja srednje Europe 2008. dobitnik tri od četiri priznanja koje dodjeljuje Cisco Education Recognition, Extraordinary Contributions i Pioneer Recognition kao jedina akademija u svijetu, 2005 NetAkademija proglašena je najboljom lokalnom Cisco akademijom u EMEA regiji. Nositelj je nekoliko priznatih industrijskih certifikata: CompTIA A+, MCP, CCNA, CCAI, CCNP, NLP-Practitioner IANLP.

Dr. sc. Krešimir Meštrović, osobni podatci su na stranici 18.